

不同深施肥方式对稻田氨挥发及水稻产量的影响

周平遥, 张震, 王华, 肖智华, 徐华勤, 汪久翔

引用本文:

周平遥, 张震, 王华, 等. 不同深施肥方式对稻田氨挥发及水稻产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(11): 2683–2691.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0441>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

太湖地区集约化农田氮素减排增效技术实践

闵炬, 孙海军, 陈贵, 姜振萃, 陆扣萍, 纪荣婷, 施卫明

农业环境科学学报. 2018, 37(11): 2418–2426 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1287>

施氮方式及测定方法对紫色土夏玉米氨挥发的影响

张翀, 李雪倩, 苏芳, 朱波, 巨晓棠

农业环境科学学报. 2016, 35(6): 1194–1201 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.06.024>

沼液在稻田的精确施用及其环境效应研究

杨润, 孙钦平, 赵海燕, 邹国元, 刘本生, 李恋卿

农业环境科学学报. 2017, 36(8): 1566–1572 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1617>

沼液与有机肥配施条件下氮损失风险的研究

周炜, 孙国峰, 王鑫, 童红玉, 盛婧

农业环境科学学报. 2019, 38(8): 1743–1750 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1614>

生活污水尾水灌溉对秸秆还田稻田氨挥发的影响

李梦瑶, 王旭刚, 徐晓峰, 段婧婧, 薛利红, 杨林章

农业环境科学学报. 2020, 39(7): 1623–1632 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0084>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

周平遥, 张震, 王华, 等. 不同深施肥方式对稻田氨挥发及水稻产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(11): 2683–2691.

ZHOU Ping-yao, ZHANG Zhen, WANG Hua, et al. Effects of deep fertilization methods on ammonia volatilization and rice yield in paddy fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(11): 2683–2691.



开放科学 OSID

不同深施肥方式对稻田氨挥发及水稻产量的影响

周平遥, 张震, 王华*, 肖智华, 徐华勤, 汪久翔

(湖南农业大学资源环境学院, 洞庭湖区农村生态系统健康湖南省重点实验室, 长沙 410128)

摘要:为探讨减少农田氨排放的方法,探究不同深施肥方式对稻田氨挥发损失、氮素利用率及水稻产量的影响,为水稻合理施肥提供理论依据,在湖南省长沙市金井镇长沙农业环境观测站布置盆栽试验,试验设7个处理,分别为: N_0 (不施化肥)、S300(传统氮肥撒施)、S210(减氮30%+传统氮肥撒施)、R5(减氮30%+条施,深度为5 cm)、R10(减氮30%+条施,深度为10 cm)、B5(减氮30%+大颗粒球肥深施,深度为5 cm)、B10(减氮30%+大颗粒球肥深施,深度为10 cm)。施肥后第1 d进行氨挥发连续性监测,直至施肥处理氨排放量与不施肥处理无明显差异为止,并在水稻成熟期测定氮含量和产量。结果表明,深施处理可降低田面水铵态氮浓度,促进植株氮素吸收。与S300处理相比,氨挥发损失量降低了30.13%~47.85%。与S210处理相比,深施处理氮素回收率(NRE)提高了9.16%~29.44%;氮素农艺利用效率(NAE)增加了13.85%~32.14%;籽粒生产效率(NGPE)增加了12.18%~28.27%。在减氮30%的基础上,深施处理水稻产量较S210处理增加了12.79%~28.27%,其中B10处理显著减少氨挥发损失量并提高氮素利用率。这说明深施处理有效降低了稻田氨挥发损失,提高了氮素利用率,其中以B10处理(减氮30%+10 cm大颗粒球肥深施)效果最佳;同时深施肥的机械化需要进一步研发和推广。

关键词:减氮;深施;氨挥发;水稻;产量

中图分类号:S511;S147.2 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2020)11-2683-09 doi:10.11654/jaes.2020-0441

Effects of deep fertilization methods on ammonia volatilization and rice yield in paddy fields

ZHOU Ping-yao, ZHANG Zhen, WANG Hua*, XIAO Zhi-hua, XU Hua-qin, WANG Jiu-xiang

(College of Resources & Environment and Hunan Provincial Key Laboratory of Rural Ecosystem Health in Dongting Lake Area, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: In order to explore the method of reducing ammonia emissions from farmland, the effects of different deep fertilization methods on the ammonia volatilization loss, nitrogen utilization rate, and rice yield in rice fields were determined to provide a theoretical basis for rational fertilization of rice. Pot experiments were arranged in the Changsha Agricultural Environment Observatory in Jinjing Town, Changsha City, Hunan Province. The effects of different deep fertilization methods on the ammonia volatilization loss, nitrogen utilization efficiency, and rice yield were studied. Seven treatments were used, namely N_0 (without chemical fertilizer), S300 (traditional nitrogen fertilizer application), S210 (30% nitrogen reduction+traditional nitrogen fertilizer application), R5 (30% nitrogen reduction+strip depth of 5 cm), R10 (30% nitrogen reduction+strip depth of 10 cm), B5 (30% nitrogen reduction+ball depth of 5 cm), and B10 (30% nitrogen reduction+ball depth of 10 cm). Ammonia volatilization was continuously monitored on the first day after fertilization until there was no significant difference between the ammonia emissions from the fertilization treatment and non-fertilization treatment, and the nitrogen content and yield were determined at the mature stage of rice. The results showed that the deep application treatment could reduce the

收稿日期:2020-04-19 录用日期:2020-07-06

作者简介:周平遥(1997—),女,湖南郴州人,硕士研究生,从事农业生态学研究。E-mail:876207135@qq.com

*通信作者:王华 E-mail:wangchina926@hunau.edu.cn

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC0213302);湖南省重点研发计划项目(2017NK2383);湖南省水产产业技术体系项目

Project supported: The National Key R&D Program of China (2018YFC0213302); The Key R&D Program of Hunan Province, China (2017NK2383); The Aquatic Industry Technology System Project of Hunan Province, China

water concentration of NH_4^+-N in the field surface and promote the nitrogen uptake by plants. Compared with the S300 treatment, the ammonia volatilization loss decreased by 30.13%~47.85%. Compared with the S210 treatment, the nitrogen recovery rate of the deep application increased by 9.16%~29.44%, the nitrogen agronomic efficiency increased by 13.85%~32.14%, and the grain production efficiency increased by 12.18%~28.27%. Based on the nitrogen reduction of 30%, the yield of rice treated with deep application increased by 12.79%~28.27% compared with that of the S210 treatment. The B10 treatment significantly reduced the ammonia volatilization loss and increased the nitrogen utilization rate. As a result, deep application can effectively reduce the ammonia volatilization loss and increase the nitrogen utilization rate in rice fields, and the B10 treatment (30% nitrogen reduction+ball depth of 10 cm) is the most advantageous. The mechanization of deep fertilization needs to be further developed and popularized.

Keywords: nitrogen reduction; deep placement; ammonia volatilization; rice; yield

水稻是世界上重要的粮食作物,占中国粮食总产量的40%^[1],为我国60%以上的人口提供食物。氮素是水稻生长必不可少的元素之一,对提高水稻产量起着至关重要的作用。在我国,农民往往施用过量的氮肥来保证水稻产量。其中水稻单季生产农民习惯施氮量平均为 $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,与世界平均水平相比高出约75%,在高产田块中,水稻氮肥施用量高达 $300\sim 450\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[2-3],氮素利用率仅为30%~35%^[4]。过量的氮素养分通过各种途径流失,导致环境污染。农田中氮肥损失主要是反硝化作用导致的 N_2 挥发,其次是氨(NH_3)挥发和水体径流、淋溶损失。其中大气氨易与空气中二氧化氮和二氧化硫发生中和反应形成雾霾,是主要的空气污染物之一^[5-6]。

温度、风速、田面水铵态氮浓度、田面水pH值等都会影响稻田氨挥发。前人研究结果表明,施用缓释肥料控制尿素水解速率,阻隔肥料与土壤脲酶接触,进而降低田面水铵态氮浓度,减少氨挥发损失^[7];Silva等^[8]发现与仅施尿素的对照组相比,在土壤中添加脲酶抑制剂降低了土壤pH值和土壤有机碳(SOC)含量,减少了氨的挥发。但是,缓释肥料在制作工艺成本和土壤适用方面存在着较大的差异;脲酶抑制剂在水田中延缓尿素水解作用时间较短,且无法减少尿素流失。氮肥减量深施是目前降低氮素损失的一种施肥方式,该方式将氮肥深施至一定深度,通过强烈的还原环境和带有负电荷的土壤胶体减缓尿素水解,使得水解的铵态氮能被周围的土壤颗粒迅速吸附,进而降低田面水铵态氮浓度,实现减少环境污染和养分流失^[9]。研究不同深施肥方式对植株干物质积累、氮肥利用率和氨挥发的影响具有重要意义。Yao等^[10]研究表明,尿素深施可以显著降低氨挥发量,尿素深施处理的氨挥发通量和氨挥发损失率分别比表施处理下降了91%和92%;并且深施处理可以使土壤中的铵态氮长时间保持较高浓度,为水稻生长提供充足和均衡

的养分,显著促进植株对氮素的吸收。Jiang等^[11]通过对玉米地进行尿素减量深施,发现减量的处理组能满足玉米对氮素的需求,产量与对照组无显著性差异。因此,通过改变施肥方式,把氮肥集中深施在水稻根系附近,是减少环境污染、提高氮肥利用率的一个有效途径。

上述研究多是在中性或碱性土壤上进行的,而在酸性土壤上,氮肥深施的效果尚不明确。此外,由于当前很多土壤经过长期大量施肥往往已经比较肥沃,在进行氮肥试验时经常难以灵敏地反映出减量施肥或施肥措施的效果。因此,本研究选取次表层贫瘠水稻土,进行氮肥深施盆栽试验,以期能够敏感地反映农田 NH_3 挥发和水稻产量在不同深施肥方式下的施肥效果,探讨减少氨挥发、提高水稻氮肥利用率的合理施肥方式,为稻田土壤的生态保育提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究地点

本盆栽试验在长沙县金井镇中国科学院长沙农业环境观测站进行($112^\circ 56'\sim 113^\circ 30'\text{E}$ 、 $27^\circ 55'\sim 28^\circ 40'\text{N}$)。该地点处于典型亚热带湿润季风气候区。年平均气温 17.5°C ,无霜期274 d。降水集中于4—10月,年降雨量在 $1\ 200\sim 1\ 500\text{ mm}$ ^[12]。年日照时数1 663 h,相对湿度80%左右。区内海拔高度为45~350 m,土壤采自大田试验基地内深层土壤(100 cm),将采集的土壤风干磨碎后,装入塑料集装箱。

水稻种植采用硫酸铵(21%N)作为氮肥,磷酸二氢铵(61%P、12%N)为磷肥,氯化钾(60% K_2O)为钾肥。用量分别为 $300\text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $150\text{ kg P}_2\text{O}_5\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $200\text{ kg K}_2\text{O}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。除 N_0 处理外,施肥处理所需磷、钾肥用量一致。施肥量为大田施肥量的两倍。盆栽水稻品种为“穗香优香丝占”,生育期约122 d。供试土壤主要性质见表1。

1.2 研究设计

盆栽试验采用42 cm×31.5 cm×22.5 cm塑料集装箱种植,每盆种植4株水稻。试验设7个处理: N_0 (不施化肥)、S300(传统氮肥撒施)、S210(减氮30%+传统氮肥撒施)、R5(减氮30%+条施、深度为5 cm)、R10(减氮30%+条施、深度为10 cm)、B5(减氮30%+大颗粒球肥深施,深度为5 cm)、B10(减氮30%+大颗粒球肥深施,深度为10 cm)。每个处理设3个重复。棚顶用塑料薄膜覆盖,防止雨水干扰,并铺盖防鸟网。

试验水稻于2019年6月23日进行移栽。传统氮肥撒施处理磷钾肥在插秧前均作为基肥一次性施入,氮肥75%作为基肥,25%作为追肥在水稻分蘖期施入。其他深施处理肥料在水稻插秧前后分两次施入,其中水稻插秧前施入氮磷肥,其用量分别为60 kg N·hm⁻²和75 kg P₂O₅·hm⁻²,其余基肥均在水稻插秧后以大颗粒球肥方式一次性施入大颗粒球肥深施处理。球肥制作过程如下:把定量的氮磷钾肥充分混合后,按肥料与黏土的比例2:1添加红壤,喷水再次充分混合,制成直径为1~1.5 cm的肥球,放入到烘箱中30℃烘干^[13]。施肥时利用注射器迅速施入两蔸水稻中间。对于条施处理,首先挖出一条5 cm或10 cm深度的沟,将肥料均匀撒入,再拿土进行覆盖。农田管理按照当地农民习惯,在水稻生育期间保持5 cm左右的水层。2019年9月27日水稻收获。

1.3 样品采集与分析

1.3.1 植株样品采集及处理

在水稻成熟期将整盆4株全部取出,取样时将植株带根挖出,分为根和地上部(茎、叶、穗),洗净吸干水分,分别装于牛皮纸袋中。

样品处理完后105℃杀青30 min,于65℃恒温烘干称质量,采用不锈钢粉碎机磨碎后测定水稻氮素养分含量。植株全氮前处理:先称取样品0.2 g,加入5 mL浓硫酸进行碳化,再移至电热板进行消煮,消煮成无色透明且没有沉淀物后,转移至50 mL容量瓶定容,最后用滤纸过滤至50 mL塑料瓶中作为待测液。全氮含量采用H₂SO₄-H₂O₂消煮,凯氏定氮法测定。

1.3.2 水稻考种测产

水稻产量在水稻成熟期将4株水稻全部取出,带回实验室进行脱粒测产。

1.3.3 稻田氮挥发测定

本试验氮挥发收集采用密闭室抽气法。收集装置由真空泵、密闭室、洗气瓶、流量计等组成。密闭室为圆柱形的有机玻璃,内径14 cm,高15 cm。氨的吸收液为0.05 mol·L⁻¹稀硫酸,定量准确吸取100 mL稀硫酸放入洗气瓶。通过流量计将室内换气次数设置为15~20次·min⁻¹。抽气时段为上午9:00—11:00和下午15:00—17:00,每日抽4 h来代表全天24 h氮挥发通量。

氮挥发监测于施肥后的第1 d进行连续性采样,直至施肥处理与不施肥处理(N_0)的氨排放量无明显差异。同时每日上午采集水样,测定田面水铵态氮浓度、全氮及pH值。收集的氨挥发吸收液和田面水铵态氮浓度及全氮均采用AA3流动分析仪进行测定,采用便携式pH计测定田面水pH值。温度条件由该地基准气象站提供数据。

1.4 计算公式

1.4.1 氮挥发相关计算

$$F = \frac{C \times V \times 6 \times 10^{-6}}{\pi \times r^2 \times 10^{-4}}$$

式中: F 表示氨排放通量,kg·hm⁻²·d⁻¹; C 表示吸收液中铵态氮浓度,mg·L⁻¹; V 表示稀硫酸吸收液体积,L;6表示换算为1 d排放通量;10⁻⁶表示mg转换为kg; r 表示收集氨挥发的密闭室半径;10⁻⁴表示m²转换为hm²。

$$R = (F_w - F_0) / f$$

式中: R 表示氨挥发损失率,%; F_w 表示施氮区氨排放累积通量,kg·hm⁻²·d⁻¹; F_0 表示不施氮区氨排放累积通量,kg·hm⁻²·d⁻¹; f 表示肥料施氮量,kg·hm⁻²。

1.4.2 氮素利用率计算

采用Pan等^[14]和Ye等^[15]的方法计算了氮素回收率(NRE)、氮素农艺利用效率(NAE)、氮生理效率(NPE)、籽粒生产效率($NGPE$)。公式如下:

$$NRE = (N - N_0) / F$$

表1 试验地土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of soil at test site

pH	全氮 Total nitrogen/ (g·kg ⁻¹)	全磷 Total phosphorus/ (g·kg ⁻¹)	全钾 Total potassium/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮 Alkaline nitrogen/ (mg·kg ⁻¹)	速效磷 Fast-acting phosphorus/(mg·kg ⁻¹)	速效钾 Quick-acting potassium/(mg·kg ⁻¹)	有机质 Organic matter/ (g·kg ⁻¹)
5.98	0.82	0.36	15.65	88.67	10.26	78.83	13.89

$$NAE = (GY - GY_0) / F$$

$$NPE = (GY - GY_0) / (N - N_0)$$

$$NGPE = GY / N$$

式中: N 表示施氮处理植株地上部氮吸收量, $\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$; N_0 表示不施氮处理植株地上部氮吸收量, $\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$; GY 表示施氮处理籽粒干物质量, g ; GY_0 表示不施氮处理籽粒干物质量, g ; F 表示肥料施氮量, $\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$ 。

1.5 数据分析

使用 Microsoft Excel 2019 和 SPSS 18.0 软件对数据进行统计分析。根据 LSD 检验,采用单因素方差分析比较和判断处理之间的差异($P < 0.05$)。采用 Origin 8.0 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 施肥方式对稻田氨挥发的影响

2.1.1 氨挥发通量动态变化

从图1可知,各施肥处理氨挥发量均在基肥施用后第1 d出现最大值。S300处理氨挥发通量峰值最高,为 $0.41 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$;B10处理氨挥发通量峰值最低,为 $0.22 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,较S300处理降低46.34%;S210处理峰值较S300处理降低了35.31%;其他深施处理(R5、R10、B5)峰值较S300处理也降低了44.12%~46.04%。在同一施肥深度上,B5处理的氨挥发通量峰值较R5处理降低了1.40%;B10处理的氨挥发通量峰值较R10处理降低了0.13%。基肥施用后第3~6 d,各施肥处理氨挥发量均呈急剧下降趋势。

第9 d施用追肥后,传统氮肥撒施处理出现第二个氨挥发高峰,此时S300、S210处理氨挥发量分别为 $0.26 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $0.21 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,较第一次峰值低,主要是因为分蘖肥的施氮量少于基肥施氮量。其他施肥处理由于一次性深施无第二个峰值。随后各

施肥处理氨挥发量均呈下降趋势,直至施肥后第23 d时,各施肥处理氨挥发量与不施肥处理(N_0)均无明显差异。稻田氨挥发测定期间,传统氮肥撒施处理的氨挥发量呈现快速增加-下降-增加-下降-平稳的趋势;而深施处理的氨挥发量呈现快速增加-下降-平稳的趋势。

2.1.2 氨挥发损失量及损失率

由表2可知,稻田氨挥发监测期内(23 d),传统氮肥撒施处理S300和S210氨挥发损失量(率)最高,分别为 $3.95 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (1.00%)和 $3.32 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (1.13%), N_0 处理氨挥发累计损失量最低,施肥处理中B10处理氨挥发累计损失量处于极低水平,各施肥处理间存在显著性差异。氨挥发累计损失量表现为 $S300 > S210 > R5 > B5 > R10 > B10$,B10处理降低氨挥发累计损失量的优势最显著。

氮肥减量深施处理可以显著降低氨挥发损失,其中条形深施处理(R5、R10)氨挥发损失率分别为0.86%、0.62%,较S300处理分别降低了14.00%、38.00%。大颗粒球肥深施处理(B5、B10)氨挥发损失率分别为0.73%、0.53%,较S300处理分别降低了27.00%、47.00%。在同一施肥深度上,B5处理的氨挥发损失率较R5处理降低了15.12%;B10处理的氨挥发损失率较R10处理降低了14.53%。由此可知,施肥深度越深,氨挥发损失量(率)则越低;同一施肥深度下,大颗粒球肥施肥方式对抑制氨挥发损失效果最佳。以上结果表明施肥方式对氨挥发损失量有显著的影响,深施处理能够有效降低氨挥发,且深度越深,效果越好。

2.2 氨挥发的影响因子及其相关性分析

2.2.1 田面水铵态氮浓度和总氮浓度

由图1和图2可知,施肥处理的田面水铵态氮浓度、田面水总氮浓度与氨挥发量日变化趋势基本一

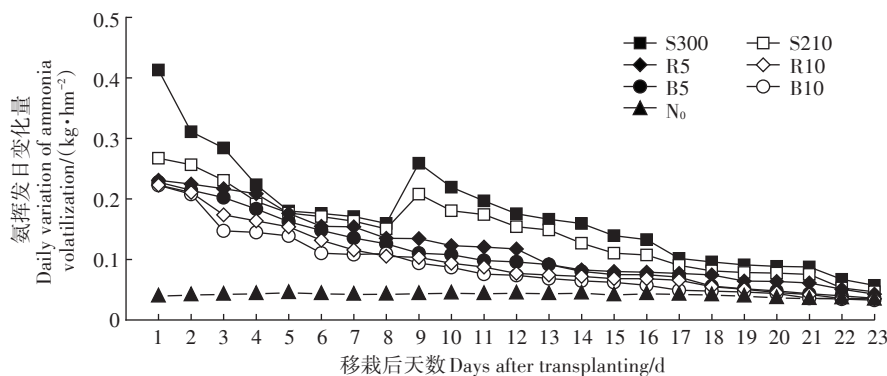


图1 不同施肥处理的氨挥发日变化量

Figure 1 Daily variation of ammonia volatilization in different fertilization treatments

表2 不同施肥方式下氨挥发损失量和氨挥发损失率

Table 2 Ammonia volatilization loss and ammonia volatilization loss rate with different fertilization methods

处理 Treatments	施氮量 Nitrogen application/ (kg·hm ⁻²)	氨挥发损失量 Total ammonia volatilization/ (kg·hm ⁻²)	氨挥发损失率 Ammonia volatilization loss rate/%
N ₀	0	0.94±0.01g	—
S300	300	3.95±0.05a	1.00
S210	210	3.32±0.05b	1.13
R5	210	2.76±0.03c	0.86
R10	210	2.25±0.02e	0.62
B5	210	2.47±0.02d	0.73
B10	210	2.06±0.06f	0.53

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: The different lowercase letters in a column indicate significant differences among treatments at $P<0.05$ levels. The same below.

致,均在施入基肥后第1 d达到最高峰,第2个高峰出现于追肥当天,之后逐渐下降。由图2a、图2b可知,施用基肥后第1 d S300处理的铵态氮浓度和总氮浓度最高,分别为249.07 mg·L⁻¹和291.66 mg·L⁻¹;B10处理的浓度最低,分别为55.79 mg·L⁻¹和99.73 mg·L⁻¹;相较于S300处理,深施处理基肥后铵态氮浓度峰值和总氮浓度峰值分别降低43.75%~77.60%和17.68%~65.81%。同一施肥深度下,铵态氮浓度峰值和总氮浓度峰值B5处理较R5处理降低了46.93%和17.48%,B10处理较R10处理降低了20.35%和48.26%。追肥当天S300处理的峰值最高,铵态氮浓度和总氮浓度分别为172.39 mg·L⁻¹和221.94 mg·L⁻¹,相较于S300处理,深施处理追肥后铵态氮浓度峰值和总氮浓度峰值分别降低79.15%~86.26%和63.97%~81.42%。在同一施肥深度下,铵态氮浓度峰值和总氮浓度峰值B5处理较R5处理降低了6.25%和9.08%;B10处理较R10处理降低了27.68%和37.86%。23 d后各处理无明显差异。施肥处理田面水铵态氮浓度、田面水总氮浓度总体表现为S300>S210>R5>B5>R10>B10,表明传统氮肥撒施处理由于肥料撒于土壤表面导致田面水铵态氮浓度和总氮浓度高,而深施处理由于肥料深埋在土壤中,可显著降低田面水铵态氮浓度和总氮浓度峰值。

2.2.2 田面水pH值

由图2c可知,田面水的pH值变化幅度较小,且总体呈现先升后降的趋势。施用基肥后第1 d,S300处理pH值最大,为6.01,B10处理pH值最低,为5.69;传统氮肥撒施处理(S300、S210)在追肥当天出现一次

小幅增加。在第23 d时,所有处理的pH值均降至最低,范围在4.27~4.49,并且施肥处理间无明显差异。田面水pH值呈酸性的主要原因是施用的氮肥种类为硫酸铵,属于强酸弱碱盐;同时南方水稻土又呈酸性。因此,田面水pH、铵态氮浓度和总氮浓度趋势基本一致,在氨挥发测定的23 d内,田面水pH值随着铵态氮和总氮浓度的下降而降低,可能是由于在施肥后,肥料的释放速率影响田面水铵态氮和总氮的浓度,进而影响田面水pH的变化。

2.2.3 温度

图2d为稻田氨挥发监测期间温度的变化趋势。由图所示,最高温度、最低温度及平均温度呈现不规则变化,但变化趋势相近,平均气温波动较大;在整个氨挥发监测期间,最大值出现在施肥后第6 d,而氨挥发量的最大值出现在施肥后第1 d,说明温度的峰值与氨挥发量的峰值不一致。与氨挥发量(图1)相比较,温度上升对氨挥发量有一定影响,但影响较小。

2.2.4 氨挥发累计量与氨挥发影响因子相关性分析

采用Pearson相关分析对稻田田面水pH、铵态氮浓度、全氮浓度、温度等氨挥发影响因子与氨挥发累计量进行相关性分析(表3)。结果表明,田面水中的pH值及铵态氮浓度和总氮浓度与氨挥发量均呈极显著正相关,相关系数分别为0.936**、0.902**、0.957**;而温度与氨挥发量的相关性不显著,相关系数为0.088。因此,在上述4种影响因子中,田面水铵态氮浓度、全氮浓度和pH值是影响氨挥发的主要因素。

2.3 水稻植株干物质积累及产量差异

由表4可知,水稻成熟期各施肥处理在干物质积累量和产量之间存在明显差异。B10处理在总干物质积累量和地上部干物质积累量上显著高于S300处理,分别为738.22 g·pot⁻¹和510.59 g·pot⁻¹;与S300处理相比,B10处理成熟期的总干物质积累质量和地上部干物质积累量分别增长了13.43%和6.01%。在同一施肥深度上,B5处理的总干物质积累量和地上部干物质积累量较R5处理分别增长了3.16%和4.22%;B10处理的总干物质积累量和地上部干物质积累量较R10处理分别增长了14.89%和7.87%。深施5 cm处理(B5、R5)在水稻干物质积累量上低于深施10 cm处理(B10、R10),说明植株营养吸收主要集中在根下10 cm附近。B10处理水稻根冠比显著高于其他施肥处理,根冠比差异主要体现在根部器官干物质积累量。说明大颗粒球肥深施肥方式可以提高根的活力,

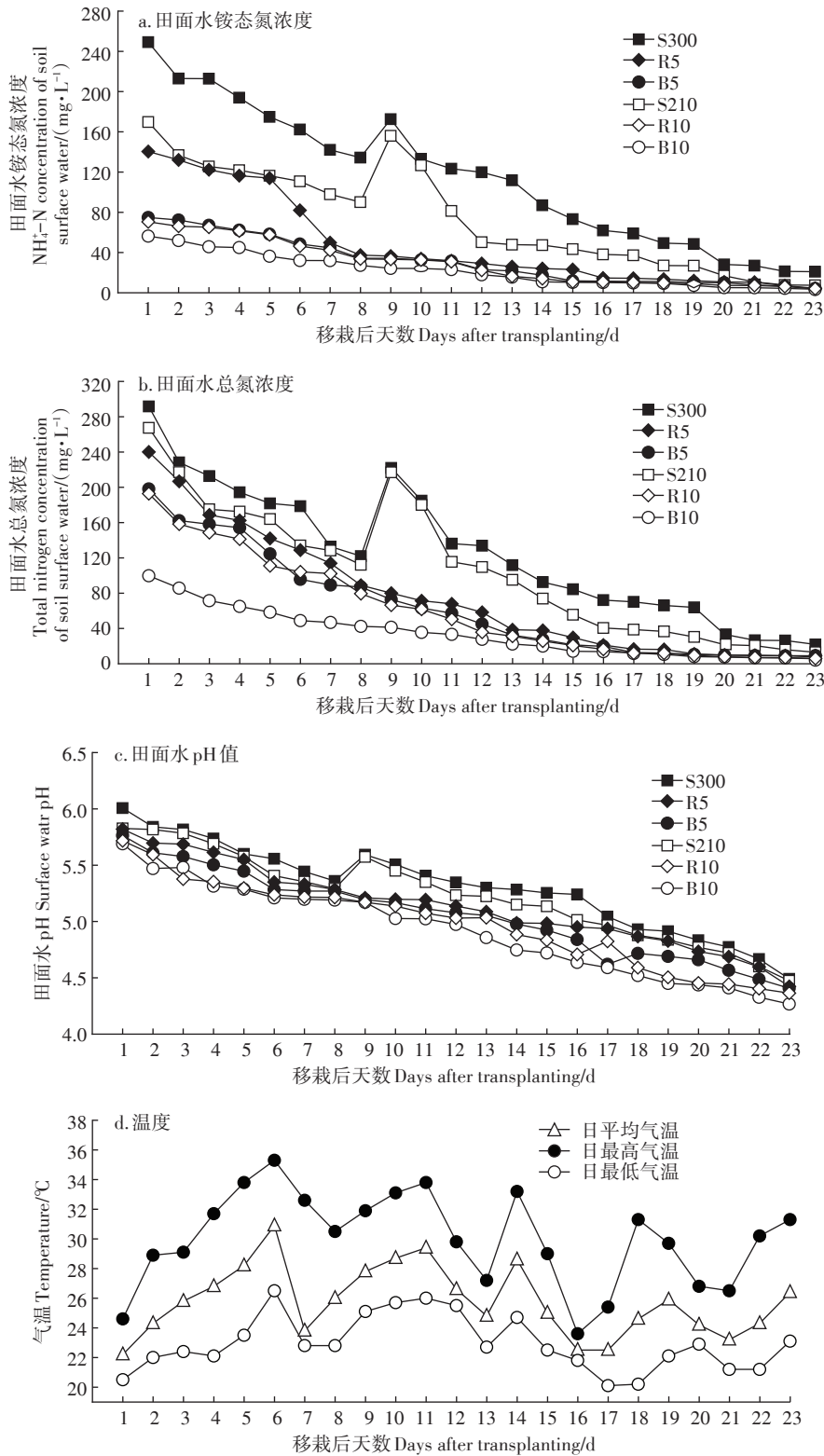


图2 施肥后氨挥发影响因子的变化

Figure 2 Changes of influence factors of ammonia volatile after fertilization

促进吸收营养养分,进而影响水稻产量。
各施肥处理间,B10处理比S300处理增产7.32%,差异不显著;深施处理(B5、B10、R5、R10)均

与S210处理的产量存在显著差异,分别比S210处理增产了12.79%、28.27%、12.18%、14.49%。在同一施肥深度上,B5处理产量较R5处理提高0.54%;B10处

表3 氨挥发影响因子与氨挥发量的相关性($n=138$)

Table 3 R values between ammonia volatilization and its influence factors

变量 Variable	氨挥发 Ammonia volatilization	田面水铵态氮浓度 $\text{NH}_4\text{-N}$ concentration of soil surface water	田面水总氮浓度 Total nitrogen concentration of soil surface water	田面水pH Surface water pH	温度 Temperature
氨挥发 Ammonia volatilization	1				
田面水铵态氮浓度 $\text{NH}_4\text{-N}$ concentration of soil surface water	0.902**	1			
田面水总氮浓度 Total nitrogen concentration of soil surface water	0.957**	0.924**	1		
田面水pH Soil surface water pH	0.936**	0.821**	0.910**	1	
温度 Temperature	0.088	0.139	0.137	0.197*	1

注:**代表在0.01水平(双侧)上显著相关。*代表在0.05水平(双侧)上显著相关。
Note: ** indicates significant correlation at 0.01(bilateral). * indicates significant correlation at 0.05(bilateral).

表4 不同施肥方式下水稻在成熟期干物质积累量及产量

Table 4 Dry matter accumulation and yield of medium rice at different growth stages under different fertilization methods

处理 Treatments	根 Root biomass/ ($\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$)	地上部积累量 Above ground accumulation/($\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$)	总积累量 Total accumulation/ ($\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$)	根冠比 Root-shoot ratio	实际产量 Actual yield/ ($\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$)
S300	169.18±4.78b	481.64±8.53b	650.82±13.29b	0.35b	213.66ab
S210	146.48±2.30c	411.42±1.98d	557.91±0.85d	0.36b	178.75c
R5	168.04±3.70b	450.77±1.84c	618.81±4.75c	0.37b	200.53b
R10	169.17±2.82b	473.36±2.88bc	642.53±5.54bc	0.36b	204.65b
B5	168.58±4.64b	469.78±9.97bc	638.35±6.96bc	0.36b	201.61b
B10	227.63±1.01a	510.59±14.84a	738.22±13.88a	0.45a	229.29a

理产量较R10处理提高12.04%。其产量高低表现为B10>S300>R10>B5>R5>S210。

2.4 氮素利用率

施肥方式对氮素利用效率有显著影响(表5)。在减氮30%的基础上,深施处理与S210处理相比,氮素回收率(NRE)提高了9.16%~29.44%,其中B10达到显著水平($P<0.05$);氮素农艺利用效率(NAE)增加了13.85%~32.14% ($P<0.05$);籽粒生产效率($NGPE$)增加了12.18%~28.27% ($P<0.05$)。其中,以B10处理最为显著。在同一施肥深度上,B5处理与R5处理之间无显著差异;B10处理氮素回收率(NRE)、氮素农艺利用效率(NAE)和籽粒生产效率($NGPE$)较R10处理分别提高了11.89%、13.43%和12.07%。各施肥处理的氮生理效率(NPE)差异不显著, NRE 以S300处理最低。研究结果表明肥料深施有利于水稻植株固氮,减少氮素流失,提高氮素利用率。

3 讨论

3.1 土壤基础肥力对水稻产量及氮素利用率影响

土壤肥力是影响水稻植株干物质积累和产量形

表5 不同施肥方式对水稻氮素利用率的影响

Table 5 Effects of different fertilization methods on nitrogen utilization efficiency of rice

处理 Treatments	氮素回收率 $NRE/\%$	氮素农艺利用效率 $NAE/(\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1})$	氮生理效率 $NPE/(\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1})$	籽粒生产效率 $NGPE/(\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1})$
S300	39.22c	13.34d	34.54a	14.84d
S210	45.95bc	15.60c	34.17a	17.73c
R5	50.16ab	17.76b	35.46a	19.89b
R10	53.15ab	18.17b	34.18a	20.30b
B5	52.20ab	17.87b	36.05a	20.00b
B10	59.47a	20.61a	34.77a	22.75a

成的关键。水稻增产量和增产率与土壤基础肥力成反比,土壤基础肥力越高,提供给水稻生长的基础养分越多,水稻更容易获得高产。但是基础肥力高也往往意味着土壤氮背景值高,致使氮肥的增产效果不明显。所以在基础肥力较低的土壤上施肥措施的效果更容易显现^[16-19]。为此本试验没有采用表层土壤,而是采用了肥力相对贫瘠的稻田次表层土壤。试验结果较为灵敏地反映了不同施肥措施的效果,证实了氮

肥深施能减少氨挥发、提高氮肥利用率,且大颗粒球肥效果好于条施。这一现象值得今后的相关肥料试验借鉴。

3.2 深施处理对稻田氨挥发影响

氨挥发作为农田氮素损失的途经之一,约占施氮量的9%~40%。本试验中不同施肥处理的氨挥发损失率为0.53%~1.13%,相比朱坚等^[20]研究结果有较大差异,原因在于本试验采用的氮肥种类为硫酸铵,硫酸铵本身就是抑制氨挥发损失的肥料。虽然氨挥发损失率总体较低,但各试验处理之间差异非常显著,其中以B10处理最低,S210处理最高。同一施肥深度下大颗粒球肥深施处理的氨挥发损失量显著低于条施处理,且深度越深,氨挥发损失量越低,这与其他研究结果是一致的^[21-22]。稻田氨挥发受多种因素影响,大颗粒氮肥深施后氮肥颗粒与土壤接触更充分,肥料水解速率降低,土壤铵态氮浓度持续时间更久,水稻氮素利用率提高,进而降低田面水中的铵态氮浓度、总氮浓度和pH值,这是氮肥深施处理氨挥发降低的重要原因。本研究中,田面水铵态氮浓度、总氮浓度和pH值与氨挥发呈显著正相关,但温度与氨挥发的相关性不显著,这与一些报道观点不符,但与黄思怡等^[7]、张文学等^[23]观点一致,其原因可能是本研究为大棚盆栽试验,不受降雨量的影响,且在氨挥发监测期间平均温度较低。

3.3 深施处理对水稻产量及氮素利用率的影响

水稻产量形成的本质是干物质的积累、转移和分配过程。植株干物质积累与水稻的产量密切相关,干物质积累是水稻产量的物质基础^[15]。肥料深施可以抑制肥料的释放速率,减少肥料损失,并使水稻根系与肥料充分接触,为水稻生长提供较持续、较高浓度的养分从而促进水稻分蘖,增强根系活力,增加产量^[24]。本研究中,B10深施处理显著增加水稻植株干物质积累量,其他深施处理(B5、R5、R10)的水稻产量相比S210处理也有提高;B10处理较R10处理增产12.04%,B10处理较B5处理增产13.73%。其原因一是球状肥深施处理肥料释放较缓,养分在土壤中持续时间变长,使水稻生长期有较充足的养分吸收;二是施肥深度10 cm与水稻根系的分布区域一致,可以提高水稻根系对氮素的吸收,提高氮素利用率,这与朱兆良等^[4]和蔡昆争等^[25]研究结果一致。由此可知,减量深施的施肥方式并不会降低水稻总物质积累量,反而起到了促进作用,其中以B10处理效果最佳。在减氮30%的前提下,深施处理相较于传统氮肥撒施更

能在水稻的生长阶段促进分蘖,加快籽粒灌浆,进而提高水稻产量。本研究中,深施处理的水稻氮素回收率显著高于传统氮肥撒施处理,其中以B10处理最高,为59.47%;S300处理最低,为39.22%。因此,合理的施肥方式和深度能够有效实现减排、保肥、稳产。

4 结论

(1)本研究探讨了不同深施肥方式对稻田氨挥发和水稻产量的影响。结果表明,与氮肥减量撒施相比,减量深施氨挥发损失率较减量撒施处理降低了23.89%~53.10%,且田面水的pH值及铵态氮浓度和总氮浓度与氨挥发量均呈极显著正相关。因此氮肥减量深施可有效降低田面水铵态氮浓度,进而减少稻田氨挥发损失,提高氮素利用率。

(2)大颗粒肥料深施在减缓肥料水解速度的同时,使肥料与水稻根系充分接触,促进根系对养分的吸收,进而达到稳产、增产的目的。但是由于深施技术所需人工成本较高,因此需进一步研发和推广大颗粒肥料制肥技术及施肥机具,以减少生产成本。

参考文献:

- [1] Wu W, Nie L X, Liao Y C, et al. Toward yield improvement of early-season rice: Other options under double rice-cropping system in central China[J]. *European Journal of Agronomy*, 2013, 45: 75-86.
- [2] FAO. Food and agriculture organization of the United Nations Statistical databases[DB/OL]. (2004)[2020-4-5]. <http://faostat.fao.org>.
- [3] 彭少兵, 黄见良, 钟旭华, 等. 提高中国稻田氮肥利用率的研究策略[J]. *中国农业科学*, 2002, 35(9): 1095-1103.
PENG Shao-bing, HUANG Jian-liang, ZHONG Xu-hua, et al. Research strategy in improving fertilizer-nitrogen use efficiency of irrigated rice in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(9): 1095-1103.
- [4] 朱兆良, 文启孝. 中国土壤氮素[M]. 南京: 江苏科技出版社, 1992.
ZHU Zhao-liang, WEN Qi-xiao. Soil nitrogen in China[M]. Nanjing: Phoenix Science Press, 1992.
- [5] Katata G, Hayashi K, Ono K, et al. Coupling atmospheric ammonia exchange process over a rice paddy field with a multi-layer atmosphere-soil-vegetation model[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 180(19): 1-21.
- [6] Wang G, Zhang R, Gomez M E, et al. Persistent sulfate formation from London fog to Chinese haze[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(48): 13630-13635.
- [7] 黄思怡, 田昌, 谢桂先, 等. 控释尿素减少双季稻田氨挥发的主要机理和适宜用量[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(12): 2102-2112.
HUANG Si-yi, TIAN Chang, XIE Gui-xian, et al. Mechanism and suitable application dosage of controlled-release urea effectively reducing ammonia volatilization in double-cropping paddy fields[J]. *Journal of*

- Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(12):2102-2112.
- [8] Silva A G B, Sequeira C H, Sermarini R A, et al. Urease inhibitor NB-PT on ammonia volatilization and crop productivity: A meta-analysis[J]. *Agronomy Journal*, 2017, 109(1):1-13.
- [9] Liu X, Wang H, Zhou J, et al. Effect of N fertilization pattern on rice yield, N use efficiency and fertilizer-N fate in the yangtze river basin, China[J]. *PLoS One*, 2016, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0166002>
- [10] Yao Y, Zhang M, Tian Y, et al. Urea deep placement for minimizing NH_3 loss in an intensive rice cropping system[J]. *Field Crops Research*, 2018, 218:254-266.
- [11] Jiang C, Lu D, Zu C, et al. Root-zone fertilization improves crop yields and minimizes nitrogen loss in summer maize in China[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1):15139.
- [12] 孟岑, 李裕元, 吴金水, 等. 亚热带典型小流域总氮最大日负荷(TMDL)及影响因子研究——以金井河流域为例[J]. 环境科学学报, 2016, 36(2):700-709.
- MENG Cen, LI Yu-yuan, WU Jin-shui, et al. Study on total nitrogen TMDL and its contributing factors in typical subtropical watersheds: A case study of Jinjinghe watershed[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(2):700-709.
- [13] 彭术, 张文钊, 侯海军, 等. 氮肥减量深施对双季稻产量和氧化亚氮排放的影响[J]. 生态学杂志, 2019, 38(1):153-160.
- PENG Shu, ZHANG Wen-zhao, HOU Hai-jun, et al. Effects of reduction and deep placement of nitrogen fertilizer on rice yield and N_2O emissions from double cropping paddy field[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(1):153-160.
- [14] Pan S, Wen X, Wang Z, et al. Benefits of mechanized deep placement of nitrogen fertilizer in direct-seeded rice in South China[J]. *Field Crops Research*, 2017, 203:139-149.
- [15] Ye Y, Liang X, Chen Y, et al. Alternate wetting and drying irrigation and controlled-release nitrogen fertilizer in late-season rice: Effects on dry matter accumulation, yield, water and nitrogen use[J]. *Field Crops Research*, 2013, 144:212-224.
- [16] 戴平安, 聂军, 郑圣先, 等. 不同土壤肥力条件下水稻控释氮肥效应及其氮素利用的研究[J]. 土壤通报, 2003, 34(2):115-119.
- DAI Ping-an, NIE Jun, ZHENG Sheng-xian, et al. Efficiency of nutrient utilization of controlled-release nitrogen fertilizer for rice at different soil fertility levels[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2003, 34(2):115-119.
- [17] 鲁艳红, 廖育林, 聂军, 等. 连续施肥对不同肥力稻田土壤基础地力和土壤养分变化的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(21):4169-4178.
- LU Yan-hong, LIAO Yu-lin, NIE Jun, et al. Effect of successive fertilization on dynamics of basic soil productivity and soil nutrients in double cropping paddy soils with different fertilities[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(21):4169-4178.
- [18] 张祥明, 郭熙盛, 武际, 等. 江淮地区稻田基础土壤肥力与水稻合理施用技术研究[J]. 中国农学通报, 2009, 25(15):131-135.
- ZHANG Xiang-ming, GUO Xi-sheng, WU Ji, et al. Research on basic soil fertility and reasonable fertilization technology in paddy fields in the Jianghuai Region[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(15):131-135.
- [19] 刘海涛, 李保国, 任图生, 等. 不同肥力农田玉米产量构成差异及施肥弥补土壤肥力的可能性[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(4):897-904.
- LIU Hai-tao, LI Bao-guo, REN Tu-sheng, et al. Dissimilarity in yield components of maize grown in different fertility fields and effect of nitrogen application on maize in low fertility fields[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(4):897-904.
- [20] 朱坚, 石丽红, 田发祥, 等. 湖南典型双季稻田氨挥发对施氮量的响应研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(5):1129-1138.
- ZHU Jian, SHI Li-hong, TIAN Fa-xiang, et al. Responses of ammonia volatilization to nitrogen application amount in typical double cropping paddy fields in Hunan Province[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2013, 19(5):1129-1138.
- [21] 宋勇生, 范晓晖, 林德喜, 等. 太湖地区稻田氨挥发及影响因素的研究[J]. 土壤学报, 2004, 41(2):265-269.
- SONG Yong-sheng, FAN Xiao-hui, LIN De-xi, et al. Ammonia volatilization from paddy fields in the Taihu lake region and its influencing factors[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(2):265-269.
- [22] Liu T Q, Fan D J, Zhang X X, et al. Deep placement of nitrogen fertilizers reduces ammonia volatilization and increases nitrogen utilization efficiency in no-tillage paddy fields in central China[J]. *Field Crops Research*, 2015, 184:80-90.
- [23] 张文学, 孙刚, 何萍, 等. 脲酶抑制剂与硝化抑制剂对稻田氨挥发的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(6):1411-1419.
- ZHANG Wen-xue, SUN Gang, HE Ping, et al. Effects of urease and nitrification inhibitors on ammonia volatilization from paddy fields[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2013, 19(6):1411-1419.
- [24] Xiang J, Haden V, Peng S, et al. Effect of deep placement of nitrogen fertilizer on growth, yield, and nitrogen uptake of aerobic rice[J]. *Australian Journal of Crop Science*, 2013, 7(6):870-877.
- [25] 蔡昆争, 骆世明, 段舜. 水稻根系的分布及其与产量的关系[J]. 华南农业大学学报, 2003, 24(3):1-4.
- CAI Kun-zheng, LUO Shi-ming, DUAN Shun. The relationship between spatial distribution of rice root system and yield[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2003, 24(3):1-4